системы настроить доступ сотрудников факультетов к системе через портал, разумеется, с соблюдением необходимых мер безопасности.

1.Торкатюк В.И., Дмитрук И.А., Трояновская О.Б., Токарь Л.А., Вышетравская А.С., Дриль Н.В., Горбачева Ю.И., Сухонос М.К. Реформирование высшего образования Украины и оновление его социальных идей на пути трансформации к Болонскому процессу // Стратегія посилення самостійної роботи студентів у контексті приєднання України до Болонського процесу: Матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 244 с.

2.Шутенко Л.М., Стадник Г.В., Соловйов О.В., Торкатюк В.І., Нохріна Л.А. Концептуальні проблеми формування безперервної економічної освіти в Україні за сучасних умов і перспективні напрямки її вдосконалення // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.40. – К.: Техніка, 2002. – С.146-164

3.Шутенко Л.М., Стадник Г.В., Торкатюк В.І. Проблеми і перспективні напрямки вдосконалення підготовки фахівців-економістів для будівельної галузі України // Академія будівництва України. Харківське територіальне відділення. Інформаційний бюлетень. – 2003. – №8. – С.23-24

4.Бархаєв Ю.П. “Вирощування” здатностей до самостійної роботи засобами інноваційної освітньої системи розвиваючого навчання студентів // Стратегія посилення самостійної роботи студентів у контексті приєднання України до Болонського процесу: Матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 244 с.

5.Крюков В.В., Шахгельдян К.И. Развитие информационной инфраструктуры вуза для решения задач управления: Особенности корпоративной инфраструктуры информационной среды вуза // Университетское управление. – 2004. – №4(32). – С.67-77

6.Созонов Б.А., Беспалов П.В., Беспалова Е.В., Власов В.П. Управление, экономика и прогнозирование высшего и среднего специального образования // Экспресс-информация. Вып.11. – М.: ОНИ, 1978. – 60 с.

7.Бочков В.Е., Демин Ю.Н., Хохлов Н.Г. О концепции создания и развития Университетского комплекса на основе интегрированной системы обучения в Московском государственном индустриальном университете // Университетский комплекс как важное и действенное средство непрерывности и преемственности образования в условиях его модернизации. – М.: МГПУ, 2003. – 116 с.

8.Крюков В.В., Майоров В.С., Шахгельдян К.И. Реализация корпоративной вычислительной сети вуза на базе технологии Active Directory // Труды Всерос. науч. конф. “Научный сервис в сети Интернет”. – Новороссийск, 2002. – С.253-255

Получено 02.11.2005

УДК 628.174 : 614.4

В.П.ОЛЬШАНСКИЙ, д-р физ.-матем. наук
Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
С.В.ОЛЬШАНСКИЙ
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

О НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ПАДЕНИЯ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ КАПЛИ

Предлагается решение нелинейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами, описывающего падение капли с заданной начальной скоростью, построенное в специальных табулированных функциях. Обнаружено хорошее соответствие расчётных значений скорости падения частицы в различные моменты времени с известными опытными данными.

Испаряющаяся капля является частицей распыленной жидкой струи, движущейся в нагретой газовой среде. Такие струи используются при подаче топлива в цилиндры двигателей внутреннего сгорания, при тушении пожаров, при покраске поверхностей твердых тел в специальных камерах и пр. Поэтому изучение полета испаряющихся капель тесно связано с исследованием баллистики распыленной струи, что относится к актуальным задачам.

Динамика вертикального падения испаряющейся капли рассматривалась в работе [1] с целью совершенствования пожаротушения. С этой практической направленностью также связаны статьи [2-4], в которых решение нелинейной задачи Коши строилось приближенно без учета влияния силы гравитации на процесс падения, что оправдано в случае движения частицы с большим замедлением.

В работе [5] падение капель исследовалось с целью совершенствования подачи распыленного топлива в цилиндры дизелей. При моделировании движения частицы учитывалось действие силы тяжести, но не учитывалось испарение.

Поэтому, несмотря на наличие указанных исследований, сохранилась необходимость в разработке более точных математических моделей, учитывающих упоминавшиеся факторы.

Как в работе [1], каплю считаем сферическим телом, текущий радиус которого $r(t)$ есть линейная функция времени полета t, т.е.

$$r(t) = r_0 - \gamma\, t\,, \tag{1}$$

где γ – некоторый параметр, характеризующий интенсивность испарения.

Силу сопротивления движению, аналогично [1], принимаем пропорциональной квадрату скорости движения. Поскольку рассматривается одномерная задача, все параметры модели считаем скалярными величинами.

В этих предположениях изменение скорости падения капли υ во времени описывается нелинейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами

$$\frac{d\upsilon}{dt} + \frac{\beta}{r}\upsilon^2 = g. \tag{2}$$

Здесь β – коэффициент аэродинамического сопротивления; $r = r(t)$ – текущий размер(радиус) капли; g – ускорение свободного падения.

Значение скорости истечения капли принимаем равным υ_0. Поэтому решение уравнения (2) должно удовлетворять начальному условию

$$\upsilon(0) = \upsilon_0 .$$

Уравнение (2) по типу относится к уравнениям Риккати.

Учитывая, что из (1) следует

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{dr}\frac{dr}{dt} = -\gamma\frac{d}{dr}, \tag{3}$$

представим (2) в виде

$$\frac{d\upsilon}{dr} - \frac{\beta_0}{r}\upsilon^2 = -g_0, \tag{4}$$

где $\beta_0 = \beta\gamma^{-1}$; $g_0 = g\gamma^{-1}$.

Введя новую функцию

$$u = \upsilon\beta_0^{-1}, \tag{5}$$

вместо (4) получаем

$$\frac{du}{dr} - \frac{1}{r}u^2 = -g_1 . \tag{6}$$

Здесь $g_1 = g_0\beta_0 = \beta g\gamma^{-2}$.

Чтобы избавиться в (6) от нелинейности, повысим порядок дифференциального уравнения. С этой целью примем

$$u = -rw^{-1}\frac{dw}{dr}. \tag{7}$$

Подставив выражение (7) в (6), приходим к линейному дифференциальному уравнению типа Бесселя

$$r\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{dw}{dr} - g_1 w = 0 .$$

Общим его решением будет [6]

$$w = c_1 I_0\left(2\sqrt{g_1 r}\right) + c_2 K_0\left(2\sqrt{g_1 r}\right). \tag{8}$$

Здесь c_1, c_2 – произвольные постоянные; $I_0(z)$, $K_0(z)$ – соответственно модифицированная функция Бесселя и функция Макдональда нулевого порядков.

Учитывая принятые выше обозначения (5), (7) и выражение (8), получаем общее решение уравнения (2):

$$\upsilon(t) = \frac{\tau}{2\beta_0} \frac{cK_1(\tau) - I_1(\tau)}{cK_0(\tau) + I_0(\tau)}, \tag{9}$$

где $\tau = 2\sqrt{g_1(r_0 - \gamma t)}$; $c = c_2 c_1^{-1}$ – произвольная постоянная; $I_1(\tau)$, $K_1(\tau)$ – соответственно модифицированная функция Бесселя и Макдональда первого порядка. Они появились как производные [7]

$$\frac{d}{d\tau} I_0(\tau) = I_1(\tau); \; \frac{d}{d\tau} K_0(\tau) = -K_1(\tau).$$

Константу c в (9) определяем из условия (3):

$$c = \frac{\tau_0 I_1(\tau_0) + 2\beta_0 \upsilon_0 I_0(\tau_0)}{\tau_0 K_1(\tau_0) - 2\beta_0 \upsilon_0 K_0(\tau_0)}, \tag{10}$$

где $\tau_0 = 2\sqrt{g_1 r_0}$.

Таким образом, используя таблицы функций Бесселя [7, 8], с помощью выражений (9) и (10) несложно определить скорость падающей капли в любой момент времени $t < r_0 \gamma^{-1}$, когда она не полностью испарилась.

При определении высоты падения капли $z(t)$ приходится вычислять интеграл

$$z(t) = \int_0^t \upsilon(t) dt, \tag{11}$$

который не выражается через табулированные функции. Его можно брать численно на компьютере.

Для приближенного вычисления $z(t)$ выделим в (11) главную часть, используя асимптотику

$$\upsilon(t) \underset{\tau \to 0}{\to} \upsilon_a(t) = \left[\frac{1}{\upsilon_0} - \frac{\beta}{\gamma} \ln\left(1 - \frac{\gamma t}{r_0}\right) \right]^{-1}.$$

Интеграл

$$S(t) = \int_0^t \upsilon_a(t) dt$$

выражается через табулированную в [7, 8] интегральную показательную функцию $Ei(-z)$ по формуле [9]

$$S(t)=\frac{r_0}{\beta}\exp(\eta_1)\left[Ei(-\eta_2)-Ei(-\eta_1)\right]. \qquad (12)$$

Здесь $\eta_1=\dfrac{\gamma}{\beta\upsilon_0}$; $\eta_2=\eta_1-\ln\left(1-\dfrac{\gamma t}{r_0}\right)$.

Учитывая выражение (12) вместо (11), получаем более удобную формулу для вычисления высоты падения капли

$$z(t)=S(t)+\Phi(t). \qquad (13)$$

Здесь второе слагаемое

$$\Phi(t)=\int_0^t\left[\upsilon(t)-\upsilon_a(t)\right]dt$$

значительно меньше первого и его легко оценить с помощью неравенства

$$\Phi(t)<t\left[\upsilon(t)-\upsilon_a(t)\right].$$

В приближенных расчетах можно принять

$$\Phi(t)\approx\frac{1}{2}t\left[\upsilon(t)-\upsilon_a(t)\right]. \qquad (14)$$

Таким образом, приближенное определение $z(t)$ по формулам (12)-(14) сводится к использованию таблиц специальных функций [7, 8].

Расчеты проведены при $r_0=0{,}0002$ м; $\beta=0{,}0000312$; $\gamma=0{,}0004$ м/с; $\upsilon_0=100$ м/с. Полученные значения скорости $\upsilon=\upsilon_p$ в различные моменты времени указаны во второй строке табл.1.

Таблица 1 – Расчетные и экспериментальные значения скорости падения капли в различные моменты времени

t, с	0,03	0,07	0,14	0,20	0,25
υ_p, м/с	67,6	46,3	28,7	20,8	16,4
$\upsilon_э$, м/с	67	43	30	21	18

В третьей строке табл.1 записаны значения скорости $\upsilon=\upsilon_э$, которые получены экспериментально в [1]. Наблюдается хорошее соответствие между теорией и экспериментом.

Результаты расчета пройденного каплей пути представлены в табл.2.

Таблица 2 – Значения $z(t)$, вычисленные с помощью аналитических решений и численным интегрированием квадратуры (11)

t, с	0,03	0,07	0,14	0,20	0,25
z_a, м	2,46	4,69	7,22	8,68	9,59
$z_ч$, м	2,46	4,69	7,23	8,69	9,62

Числа z_a во второй строке получены по формулам (12)-(14), а числа $z_ч$ в третьей строке – путем численного интегрирования квадратуры (11) на интервале $t \in [0;0{,}5 r_0 \gamma^{-1}]$. За это время происходит двукратное уменьшение начального радиуса капли, что считается граничным при подаче распыленного огнетушащего вещества [1]. В силу этого ограничения нет смысла увеличивать временной интервал исследования. Сравнение чисел, полученных разными способами в табл.2, показало, что приближенное аналитическое решение годится для расчета высоты падения капли.

Таким образом, наше исследование свидетельствует, что при квадратичном сопротивлении движению нелинейное уравнение падения испаряющейся капли имеет замкнутое решение в функциях Бесселя. Результаты расчетов значений скорости падения хорошо согласуются с опытными данными. Полученные формулы можно использовать для расчета дальности эффективной подачи распыленных огнетушащих веществ и обоснования высоты установки пламеподавителя над поверхностью возможного горения.

1.Севриков В.В., Карпенко В.А., Севриков И.В. Автоматические быстродействующие системы пожарной защиты. – Севастополь: СевГТУ, 1996. – 260 с.

2.Линчевский Е.А., Ольшанский В.П. О падении испаряющейся капли огнетушащего вещества в восходящем тепловом потоке // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. Вып.16. – Харьков: Фолио, 2004. – С.136-142.

3.Линчевский Е.А., Ольшанский В.П., Выговский А.А. Математическая модель падения испаряющейся капли огнетушащего вещества в восходящем тепловом потоке // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи: Матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конф. – К.: Укр НДІПБ МНС України, 2005. – С.225-227.

4.Ольшанский В.П., Лавинский В.И., Ольшанский С.В. О динамике испаряющейся капли жидкого огнетушащего вещества, диспергированного установкой пожаротушения // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. Вып.17. – Харьков: Фолио, 2005. – С.138-147.

5.Лышевский А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1971. – 248 с.

6.Градштейн И.М., Рыжик И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.

7.Абрамовиц А., Стиган И. Справочник по специальным функциям (с формулами, графиками и математическими таблицами). – М.: Наука, 1979. – 832 с.

8.Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977. – 344 с.

9.Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – №4. – С.67-70.

Получено 20.12.2005

УДК 621.3

Ю.А.АБРАМОВ, д-р техн. наук, А.Е.БАСМАНОВ, канд. техн. наук
Академия гражданской защиты Украины, г.Харьков

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАГРЕВАЮЩЕМСЯ РЕЗЕРВУАРЕ

Предлагается математическая модель, описывающая процессы, происходящие в резервуаре с нефтепродуктом под действием излучения от горящего соседнего резервуара. Модель предназначена для определения температуры стенок резервуара, нефтепродукта и паровоздушной смеси.

При возникновении пожара в резервуарном парке возникает опасность каскадного распространения пожара. Это связано с тем, что при загорании одного из резервуаров под действием излучения нагреваются соседние, вследствие чего может произойти их взрыв или воспламенение. Поэтому практически важным является построение математической модели нагрева резервуара с нефтепродуктом.

В работе [1] был рассмотрен нагрев стены стального резервуара под действием теплового потока от горящего резервуара. При построении модели предполагалось, что теплопередача осуществляется исключительно излучением. Такой подход связан с тем, что основная часть тепла при пожаре передается именно излучением [2]. Однако внутри нагреваемого резервуара конвективный перенос может оказать существенное влияние на распределение температур.

Допустим, что передача тепла от факела происходит только излучением, а внутри резервуара – как излучением, так и конвективным переносом. Для этого случая построим метод расчета температуры стенок резервуара, нефтепродукта и паровоздушной смеси в вертикальном стальном резервуаре (РВС).

Под действием излучения от факела нагревается крыша резервуара и обращенная к нему часть стены. Нагревающаяся стена и крыша излучают тепло как в окружающее пространство, так и внутрь резервуара, нагревая тем самым поверхностный слой нефтепродукта и противоположную часть стены. Чтобы учесть неравномерный нагрев сте-